

## 氯氧镁水泥固化余泥配合比研究

马培源<sup>1</sup>, 徐培蓁<sup>1,\*</sup>, 邹传兵<sup>2</sup>, 朱亚光<sup>1</sup>, 徐勤敏<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 北京城建北方德远实业有限公司, 北京 101300)

**摘要:** 氯氧镁水泥较普通硅酸盐水泥制备过程耗能低, CO<sub>2</sub> 产生少, 而余泥是我国大宗固废之一, 利用氯氧镁水泥固化余泥是实现余泥资源化利用更为绿色的途径。以余泥初始含水率和氯氧镁水泥掺量为变量, 以固化后的抗压强度、抗折强度为评价指标, 进行氯氧镁水泥固化余泥配合比研究; 以粉煤灰和硅灰作为氯氧镁水泥的混合材, 研究其对固化后余泥的力学性能和耐水性能的影响。实验结果表明: 氯氧镁水泥固化余泥, 余泥初始含水率为 16%, 氯氧镁水泥掺量为 20%, 氯氧镁水泥中混合材取代率为 10% 时结果较好。明确了氯氧镁水泥固化余泥的机理及可行性。

**关键词:** 氯氧镁水泥; 固化; 余泥; 混合材

中图分类号: TU526

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)06-0067-07

## Study on the mix ratios in the solidification of residual mud with magnesium oxychloride cement

MA Peiyuan<sup>1</sup>, XU Peizhen<sup>1,\*</sup>, ZOU Chuanbing<sup>2</sup>, ZHU Yaguang<sup>1</sup>, XU Qinmin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Beijing Urban Construction North Deyuan Industrial Co. Ltd., Beijing 101300, China)

**Abstract:** The preparation process of magnesium oxychloride cement consumes less energy and produces less CO<sub>2</sub> compared with ordinary Portland cement, and residual mud is one of the bulk solid wastes in China. Using magnesium oxychloride cement to solidify residual mud is a greener way to achieve resource utilization of residual mud. Using the initial moisture content of the residual mud and the amount of magnesium oxychloride cement as variables, and the compressive strength and flexural strength after solidification as evaluation indicators, this study investigates the mix ratios in the solidification of residual mud with magnesium oxychloride cement. Fly ash and silica fume are used as admixtures for magnesium oxychloride cement, and the effects of these admixtures on the mechanical properties and water resistance of solidified residual mud are studied. The experimental results show that when the initial moisture content of the residual mud is 16%, the content of magnesium oxychloride cement is 20% and the substitution rate of admixtures in magnesium oxychloride cement is 10%, the results of using magnesium oxychloride cement to solidify residual mud are

收稿日期: 2023-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878365)

作者简介: 马培源(2000—), 男, 山东德州人。硕士, 研究方向为建筑废弃物与工业废渣资源化利用。E-mail: 409564847@qq.com。

\* 通信作者: 徐培蓁(1974—), 女, 山东潍坊人。博士, 教授, 主要从事结构抗震及建筑废弃物资源化利用等方面的研究。

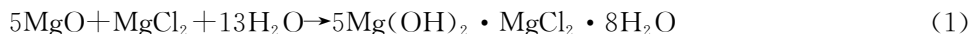
E-mail: xpzyygl@163.com。

better. The mechanism and feasibility of solidifying residual mud with magnesium oxychloride cement have been clarified.

**Key words:** magnesium oxychloride cement; solidified; residual mud; admixture

余泥渣土,是指新建、改建、扩建及拆除建筑物产生的弃土、弃料以及其他废弃物。目前,余泥渣土的资源化利用中,较优的途径是将余泥渣土中泥砂分离得到砂和含水率较高的余泥,砂可直接利用,余泥则可通过使用各类固化剂进行固化从而达到资源化利用的目的。目前常用的水泥、石灰等传统固化剂,存在能耗较高、CO<sub>2</sub>排放量较大、污染环境等问题,所以在余泥固化方面引入一种绿色固化剂迫在眉睫<sup>[1-4]</sup>。氯氧镁水泥(以下简称 MOC)是一种由 MgO-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 反应而成的三元复合体系,其制备过程中产生的 CO<sub>2</sub> 量少于普通硅酸盐水泥,相对来说更利于我国实现“碳中和、碳达峰”的目标。MOC 与传统硅酸盐水泥相比具有凝结速度快、轻质高强、耐腐蚀等优点<sup>[5-7]</sup>。

国内外许多学者的研究发现 MOC 水化过程可以分为“中和—水解—结晶”三步,MOC 主要水化产物为三相(3Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCl<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O)和五相(5Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCl<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O),三相、五相的生成化学反应方程式如式(1)(2)所示,MOC 水化过程三步交替进行。其中五相强度高于三相,三相和五相都只是介稳相,MOC 的各项性能也是由三相和五相决定的<sup>[5-9]</sup>。



影响 MOC 强度的因素有:MgO/MgCl<sub>2</sub> 摩尔比、混合材种类、混合材掺加比例、养护环境、MgO 粉活性等,但最主要的因素是 MgO/MgCl<sub>2</sub> 摩尔比和混合材种类。MgO/MgCl<sub>2</sub> 摩尔比为 6~9 时,MOC 胶凝材料的三相和五相可以长时间地保持其状态不被分解,即 MOC 性能保持较好<sup>[5-6,9-10]</sup>。

王东星等采用 MOC 作为固化剂固化淤泥,研究了一系列固化淤泥的性能,为 MOC 固化淤泥提供了理论支撑<sup>[10-11]</sup>;李欢和 MA 等分别研究了 MOC 固化飞灰和污泥中重金属的效果,确定了 MOC 固化带有重金属污染物的可行性<sup>[12-13]</sup>;LIU 等采用 MOC 作为固化剂固化软黏土,探究最优固化强度的摩尔比<sup>[14]</sup>。

大部分学者对于 MOC 的研究聚焦在使用其配聚反应吸附重金属方面<sup>[12-13]</sup>,目前 MOC 固化余泥的研究较少。以余泥初始含水率和 MOC 掺量为变量,研究 MOC 固化余泥的可行性及固化余泥的力学性能,因为 MOC 耐水性差<sup>[5-8]</sup>,以粉煤灰和硅灰作为 MOC 的混合材,研究其对固化后余泥的性能影响。这响应了我国“双碳”政策,为实现余泥低碳有效利用提供了一种新途径。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

本实验使用的余泥来自于青岛某建筑废弃物资源化利用有限公司,利用 X 射线荧光光谱分析(XRF)对余泥颗粒进行成分分析,该余泥主要由 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成,其他余泥物理性能根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)方法测得,具体数据见表 1。

MgO 为桥旭镁水泥厂过 200 μm 筛的轻烧氧化镁粉,活性为 65%,即 100 g 轻烧氧化镁粉中含有 65 g 活性氧化镁粉,烧失量为 6.0%。利用 XRF 对轻烧氧化镁粉进行分析,化学组成见表 2。MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 采用桥旭镁水泥厂氯化镁纯度为 46%的 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O,选定 MgO/MgCl<sub>2</sub> 摩尔比为 7。

### 1.2 试样制备

将原状余泥破碎烘干后经球磨机研磨 3 min,磨碎的余泥过 200 μm 的筛网得到粉状余泥颗粒,采用此余泥颗粒进行后续性能实验。取相应质量的 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 于烧杯,加入一定质量的水,快速搅拌至溶

表 1 余泥的物理性能

比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	液性指数 I <sub>p</sub>	塑性指数 I <sub>L</sub>	烧失量/ %
952	29.5	46.2	22.1	0.3	24.1	8.23

表 2 轻烧氧化镁粉化学组成

成分	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他
质量分数	84.60	6.59	1.96	0.28	0.57	6.00

液无沉淀,静置 24 h 制得氯化镁溶液。称取余泥、轻烧氧化镁粉,加入搅拌机中搅拌 5 min,把已静置 24 h 的氯化镁溶液加入搅拌均匀的余泥轻烧氧化镁粉混合物中,搅拌 5 min。将搅拌均匀的浆料分 5~6 层装入尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的钢模具中并振捣密实,在 5 MPa 的压力下分层将试块压制成型,室内养护 1 d 后脱模,将脱模的试件放置于温度为(20±2) °C 的环境下养护至规定龄期。

### 1.3 实验方案

#### 1.3.1 MOC 固化余泥配比实验

余泥再利用手段可以通过设备造粒实现规模化应用,而造粒机适宜含水率 20% 以下的料体。为确定在造粒机可以使用的条件下余泥最优初始含水率和 MOC 最优掺量,设计余泥初始含水率为 14%、16%、18% 的 3 个配比,MOC 掺量分别为 5%、10%、15%、20%、25%,共 5 种(MOC 掺量为活性氧化镁粉质量占胶凝体系总质量的百分比)。具体配比见表 3。

#### 1.3.2 混合材对 MOC 固化余泥性能影响实验

为改善 MOC 固化余泥的耐水性,提高 MOC 的软化系数及探究混合材对固化余泥强度的影响,对 MOC 进行混合材配合比设计。在 MOC 中,粉煤灰和硅灰可以发挥微集料填充效应、火山灰效应等其他效应,减小 MOC 空间网架的孔隙率从而提高其软化系数,改善耐水性差的问题,因此选用粉煤灰与硅灰 2 种混合材<sup>[15-16]</sup>。通过 MOC 固化余泥配比实验确定最优配合比为 16-M-20,在此基础上设计粉煤灰和硅灰 2 种混合材的掺量,每组的取代率分别为 10%、20%、30%、40%,具体配比见表 4、表 5。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 MOC 固化余泥配比实验结果与分析

由于 MOC 极易吸潮返卤,出现泛霜现象导致试件开裂。根据表 3 进行试件制作,将试件在规定环境下养护至 28 d 后,观察试件的表面是否有泛霜与膨胀裂缝,试件的表面情况如图 1 所示。

表 3 MOC 固化余泥配比实验

编号	结晶水与水/g	余泥/g	轻烧氧化镁粉/g	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O/g
14-M-05		1504.8	121.8	58.2
14-M-10		1425.6	243.7	116.3
14-M-15	221.8	1346.4	365.5	174.5
14-M-20		1267.2	487.4	232.7
14-M-25		1188.0	609.2	290.8
16-M-05		1504.8	121.8	58.2
16-M-10		1425.6	243.7	116.3
16-M-15	253.4	1346.4	365.5	174.5
16-M-20		1267.2	487.4	232.7
16-M-25		1188.0	609.2	290.8
18-M-05		1504.8	121.8	58.2
18-M-10		1425.6	243.7	116.3
18-M-15	285.1	1346.4	365.5	174.5
18-M-20		1267.2	487.4	232.7
18-M-25		1188.0	609.2	290.8

注:编号中,14、16、18 分别代表余泥初始含水率为 14%、16%、18%;M-05、M-10、M-15、M-20、M-25 分别代表 MOC 的掺量为 5%、10%、15%、20%、25%。如 14-M-10 代表余泥的初始含水率为 14%,MOC 的掺量为 10%。

表 4 粉煤灰掺量配比

编号	余泥/g	固化剂		
		MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O/g	轻烧氧化镁粉/g	FA/%
FA-10		209.4	438.6	10
FA-20		186.1	389.9	20
FA-30	1267.2	162.9	341.2	30
FA-40		139.6	292.4	40

注:编号中,FA 为混合材粉煤灰,10、20、30、40 分别代表粉煤灰取代活性氧化镁粉质量的 10%、20%、30%、40%。

表 5 硅灰掺量配比

编号	余泥/g	固化剂		
		MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O/g	轻烧氧化镁粉/g	SF/%
SF-10		209.4	438.6	10
SF-20		186.1	389.9	20
SF-30	1267.2	162.9	341.2	30
SF-40		139.6	292.4	40

注:编号中,SF 为混合材硅灰,10、20、30、40 分别代表粉硅灰取代活性氧化镁粉质量的 10%、20%、30%、40%。

余泥初始含水率为 14%、16% 时只有非受压面中间的位置出现轻微泛霜和可以忽略不计的细微裂缝,余泥初始含水率为 18% 时泛霜严重且出现了横向通缝。

MOC 固化的余泥出现泛霜、返卤和膨胀开裂主要是因为 MOC 中不可避免地存在未反应的  $MgCl_2$  与  $MgO$ , 独立于三相和五相之外游离的  $Mg(OH)_2$ 。未完全反应的  $MgCl_2$  可吸收空气中的水分形成  $MgCl_2$  溶液, 溶液中水分逐渐蒸发, 溶液中的  $MgCl_2$  逐渐向试件表面移动, 随着水分在空气中蒸发越来越多,  $MgCl_2$  逐渐在试件表面积累并形成泛霜、返卤。

试件中未反应的  $MgO$  和游离的  $Mg(OH)_2$  可以与外界环境中的  $H_2O$  和  $CO_2$  反应生成晶体  $MgCO_3$ , 导致体积膨胀, 从而导致试件开裂, 试件开裂后空气中的水会更容易进入, 导致其中三相和五相分解加速, 生成越来越多的  $MgCl_2$  和  $Mg(OH)_2$ , 进而导致裂缝越来越大, 最终整个试件出现贯通裂缝<sup>[5-6,7-9]</sup>。

MOC 固化余泥 3、7、28 d 的抗压、抗折强度如图 2 所示; 余泥初始含水率与 MOC 掺量对固化余泥 28 d 抗压、抗折强度的影响如图 3 所示。

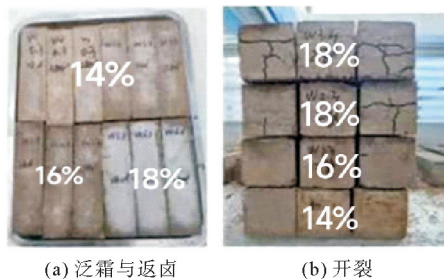


图 1 试件表面的泛霜与裂缝

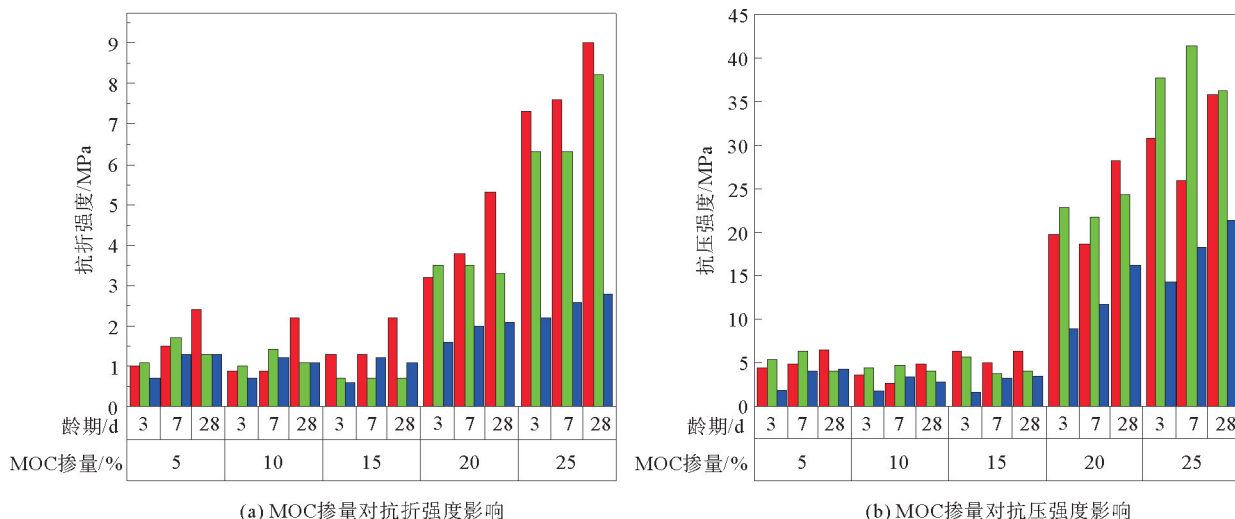


图 2 固化余泥强度随MOC掺量的变化

■ 14-M; ■ 16-M; ■ 18-M

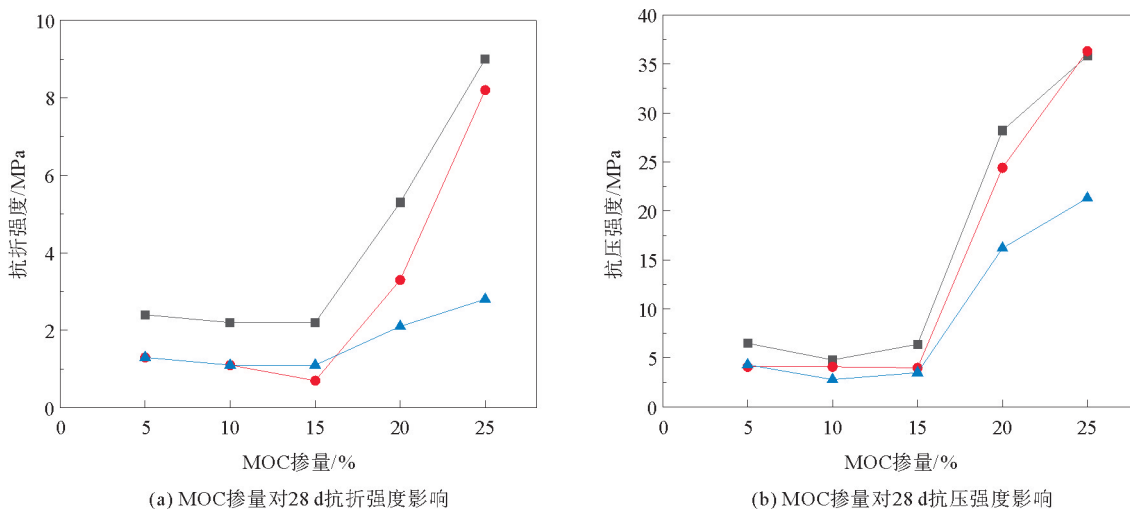


图 3 固化后28 d强度随MOC掺量变化

■ 14-M; ● 16-M; ▲ 18-M

MOC 掺量变化对固化余泥强度的影响程度较大,固化余泥的强度随着 MOC 掺量的增加而增加。在余泥初始含水率相同的条件下,当 MOC 掺量由 5% 增加到 10%、15% 时,固化后余泥的强度增长不明显,当 MOC 掺量由 15% 增加至 20%、25% 时,固化后余泥的抗压、抗折强度增长较快。其中 MOC 掺量为 20%,余泥初始含水率为 14%、16% 时,固化后 28 d 抗压和抗折强度满足《轻集料混凝土规程》(JGJ 51—90),余泥在人造骨料方面应用满足要求。

由图 3 可知,MOC 掺量由 15% 增加至 20% 时,固化余泥初始含水率为 16% 时,28 d 强度的增长幅度最大,这是因为 MOC 掺量为 15% 时,固化余泥试件内部三相和五相之间形成的空间网架的胶结应力小于内部产生  $MgCO_3$  的膨胀应力。此时  $Mg(OH)_2$  又进一步破坏了三相和五相形成的空间网架,因此试件强度较低<sup>[10]</sup>。随着 MOC 掺量增加至 20%,MOC 所占比例逐渐增大, $MgO$  与  $MgCl_2$  反应比较完全,产生较多的三相和五相,三相和五相之间的交叉互锁形成较高的胶结应力,少量  $MgCO_3$  产生的膨胀应力小于三相和五相之间的胶结互锁应力,因此试件的强度增长幅度较大。

由于 MOC 水化速度快,在 MOC 掺量为 20%,余泥初始含水率为 16% 时,7 和 28 d 强度相差不大,这意味着其  $MgO$  和  $MgCl_2$  反应较为完全,7 d 时水化基本已经结束,抗压强度不会有太大提升,后期产生膨胀晶体  $MgCO_3$  较少,产生的少量  $MgCO_3$  对提升抗压强度有正向作用但作用较小,即宏观表现为 28 与 7 d 抗压强度相比只是略微提升。相比之下余泥初始含水率为 14% 时强度随龄期增长快,这意味着其内部存在较多未完全反应的  $MgO$ ,28 d 时在不破坏空间网架的前提下生成较多  $MgCO_3$  导致其 28 d 较 7 d 强度提升明显,但是随着时间推移, $MgCO_3$  生成的越来越多,极有可能出现强度负增长的问题。所以将余泥初始含水率定为 16%,相对节约资源,亦可避免强度出现负增长现象。

MOC 掺量由 20% 增加至 25% 时,固化余泥试件的各龄期强度涨幅不大甚至个别龄期出现负增长,这主要是因为,随着 MOC 掺量的增加,试件内部出现较多过剩的  $MgO$  与  $MgCl_2$ ,以及游离在三相和五相之外的  $Mg(OH)_2$ ,虽然这时五相、三相水化晶体较多,但  $MgCO_3$  和层状  $Mg(OH)_2$  的生成量也逐渐增加,当  $MgCO_3$  较少时可在一定程度上起到填充孔隙、提高强度的作用,但  $MgCO_3$  以及层状的  $Mg(OH)_2$  过多会破坏原本三相、五相胶结互锁形成的空间网架,导致试件强度降低。综合考虑,选定余泥初始含水率为 16%,MOC 掺量为 20%。

## 2.2 混合材对 MOC 固化余泥性能影响实验结果与分析

在余泥初始含水率为 16%、MOC 掺量为 20% 的基础上,用粉煤灰、硅灰分别以 10%、20%、30%、40% 等质量取代活性氧化镁制备试件,各试件的 3、7、28 d 抗压、抗折强度,28 d 软化系数如图 4 和图 5 所示。

### 2.2.1 强度结果分析

随着混合材取代率的增加,固化余泥的强度逐渐降低。原因在于粉煤灰和硅灰颗粒较细,可发挥微集料填充效应和火山灰效应,但也会填充在  $MgO$  和  $MgCl_2$  之间,减少  $MgO$  与  $MgCl_2$  的反应进而减少三相和五相的生成。随着粉煤灰和硅灰取代 MOC 的增加,三相和五相的生成减少且结晶相生长速度减慢,最终导致生成的三相、五相不能胶结互锁,致使晶体之间的胶结能力逐渐减弱,表现为试件强度整体逐渐降低<sup>[15-16]</sup>。

混合材取代率为 10% 时,固化余泥试件的早期强度较 16-M-20 下降明显,但 28 d 龄期强度较 16-M-20 的下降较少。早期强度较低是因为 2 种混合材的水化活性平均低于  $MgO$ ,在水化早期主要起微集料填充效应,掺入延缓了 MOC 的水化速度,减少了三相和五相的形成,导致空间网架形成较慢,固化后余泥的早期强度较低。随着龄期的增长,三相和五相逐渐形成并发展, $SiO_2$  与  $Mg^{2+}$  反应生成  $MgSiO_3$  不溶晶体可以填充三相和五相形成的空间网架,降低固化后余泥的孔隙率,从而提高试件的后期强度<sup>[12,15-16]</sup>。

### 2.2.2 软化系数结果分析

MOC 固化余泥试件的耐水性较差,软化系数随着混合材取代率的增加而增加,原因在于粉煤灰与硅灰在 MOC 水化早期可以发挥其微集料效应,填充固化余泥试件内部的部分孔隙,导致孔隙率降低。随着 MOC 水化程度的提高,混合材中  $SiO_2$  可与  $Mg^{2+}$  反应生成硅酸盐晶体  $MgSiO_3$ , $MgSiO_3$  可与 MOC 水化的三相和五相胶结互锁,起到填充孔隙和完善空间网架的作用以改善固化余泥试件的孔隙率、减少 MOC

内部的水分传输通道,从而减少内部自由水的流动和空气中水的进入,确保三相和五相不被水解从而在一定程度上提高固化余泥试件的耐水性<sup>[16]</sup>。

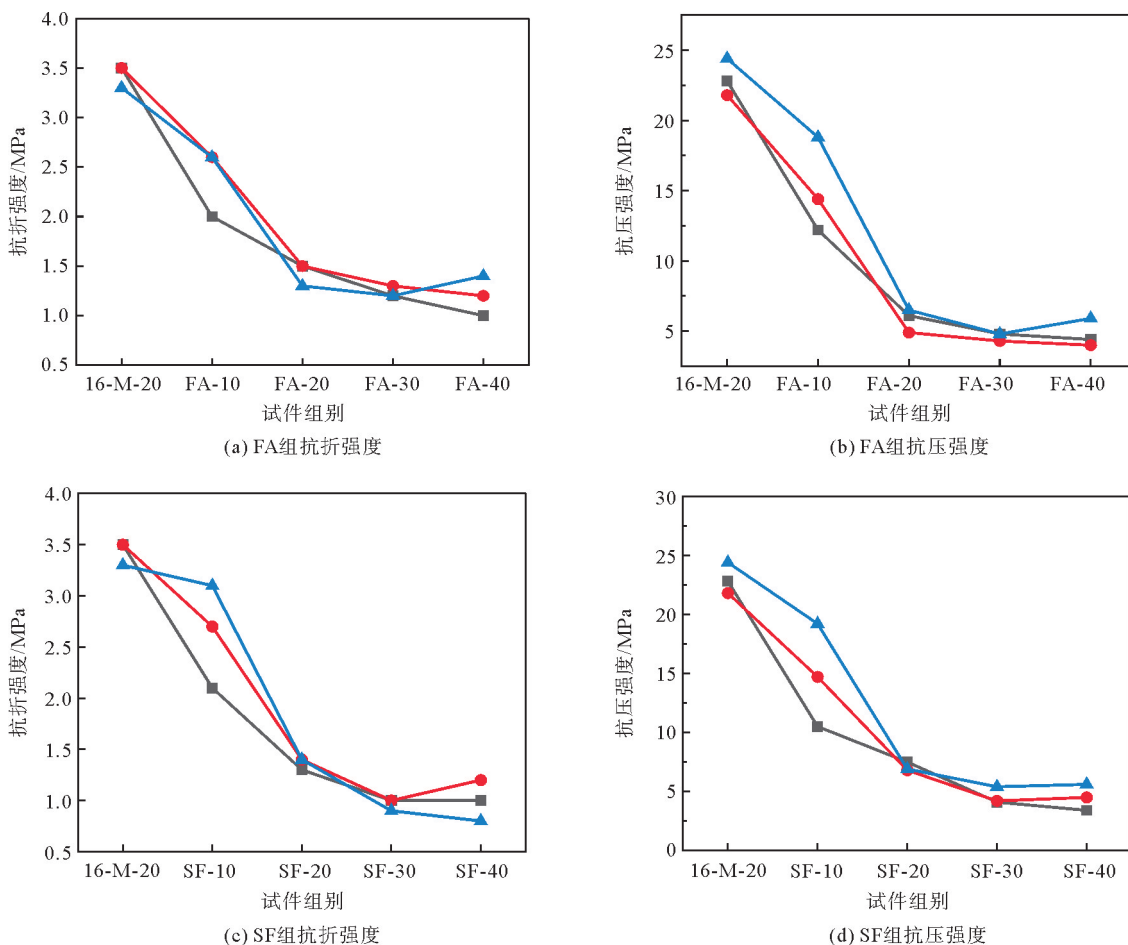


图4 固化余泥强度随混合材掺量的变化  
—■— 3 d; —●— 7 d; —▲— 28 d

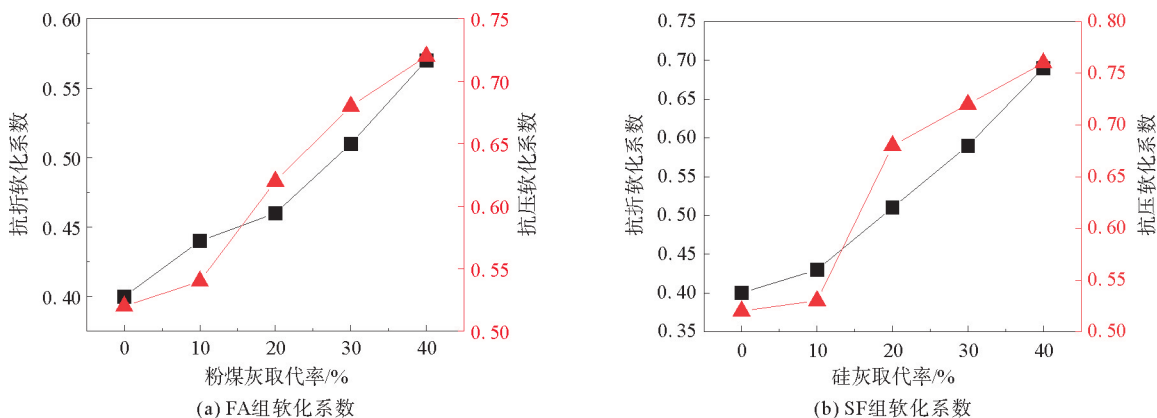


图5 混合材掺量对软化系数的影响  
—■— 抗折软化系数; —▲— 抗压软化系数

### 3 结论

1) MOC 固化余泥试件的泛霜、返卤及开裂程度随着初始含水率的增加而逐渐增加。随 MOC 掺量

增加,固化余泥试件强度增加;MOC掺量达到20%时,试件强度满足轻集料规范要求;综合长期强度和经济性考虑,MOC掺量为20%,余泥初始含水率为16%时的配比较优。

2) 随着粉煤灰、硅灰取代率的增加,固化余泥试件的强度逐渐降低、软化系数略有提高。混合材取代率为10%时,试件的强度下降较少,软化系数有所提升,确定混合材的适宜取代率为10%。

### 参考文献(References):

- [1] 张翠苗,杨红健,马学景. 氯氧镁水泥的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2014,33(1):117-121.  
ZHANG Cuimiao, YANG Hongjian, MA Xuejing. Research progress of magnesium oxychloride cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(1): 117-121.
- [2] 陈坤阳,王家远,喻博,等. 地铁工程余泥渣土环境影响研究[J]. 环境工程,2022,40(2):191-198.  
CHEN Kunyang, WANG Jiayuan, YU Bo, et al. Environmental impact evaluation of residual mud from subway engineering[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(2): 191-198.
- [3] 李思文,王毅,李师. 国外余泥渣土的处置方法及其借鉴作用[J]. 中国土地,2020(12):44-46.  
LI Siwen, WANG Yi, LI Shi. The disposal methods of foreign residual mud and soil and their reference value[J]. China Land, 2020(12): 44-46.
- [4] 黄桐,寇世聪,赵玉龙,等. 日本余泥渣土管理经验与启示[J]. 环境卫生工程,2020,28(5):61-67.  
HUNG Tong, KOU Shicong, ZHAO Yulong, et al. Management experience and enlightenment of Japan's residual mud and soil[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(5): 61-67.
- [5] 余海燕,胡林童. 氯氧镁水泥研究新进展[J]. 天津城建大学学报,2021,27(3):161-167.  
YU Haiyan, HU Lintong. New progress in research of magnesium oxychloride cement[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2021, 27(3): 161-167.
- [6] 翟健梁,赖湜,毛楠,等. 复掺矿物掺合料对氯氧镁水泥耐水性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2022,41(10):3590-3598.  
ZHAI Jianliang, LAI Hao, MAO Nan, et al. Effects of compound mineral admixtures on water resistance of magnesium oxychloride cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(10): 3590-3598.
- [7] 孙阳,刘文化,李吴刚,等. 氯氧镁水泥固化淤泥力学性能试验与微观机理研究[J]. 大连理工大学学报,2023,63(3):313-320.  
SUN Yang, LIU Wenhua, LI Wugang, et al. Mechanical properties experiment and micro-mechanisms study of solidified sludge with magnesium oxychloride cement[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63(3): 313-320.
- [8] 葛梦龙,叶倩倩,康海娇,等. 外加剂改性氯氧镁水泥研究进展[J]. 硅酸盐通报,2022,41(4):1202-1210.  
GE Menglong, YE Qianqian, KANG Haijiao, et al. Research progress of admixture-modified magnesium oxychloride cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(4): 1202-1210.
- [9] 韩鹏,王永维. 镁水泥混凝土配合比设计研究[J]. 现代交通技术,2018,15(2):18-21.  
HAN Peng, WANG Yongwei. Study on magnesium cement concrete mixture ratio design[J]. Modern Transportation Technology, 2018, 15(2): 18-21.
- [10] 王东星,陈政光. 氯氧镁水泥固化淤泥力学特性及微观机制[J]. 岩土力学,2021,42(1):77-85.  
WANG Dongxing, CHEN Zhengguang. Mechanical properties and micro-mechanisms of magnesium oxychloride cement solidified silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 77-85.
- [11] WANG D X, DI S J, GAO X Y, et al. Strength properties and associated mechanisms of magnesium oxychloride cement-solidified urban river sludge[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118933-118944.
- [12] 李欢,杨佳,魏秀珍,等. 氯氧镁水泥对生活垃圾焚烧飞灰固化作用及影响因素研究[J]. 能源环境保护,2022,36(6):38-46.  
LI Huan, YANG Jia, WEI Xiuzhen, et al. Study on the effect of magnesium oxychloride cement on the solidification of fly ash from domestic waste incineration and its influencing factors[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(6): 38-46.
- [13] MA J L, ZHAO Y C, WANG J M, et al. Effect of magnesium oxychloride cement on stabilization/solidification of sewage sludge[J]. Construction and Building Materials, 2009, 24(1): 79-83.
- [14] LIU W H, SUN Y, ZHANG J C, et al. Influence of H<sub>2</sub>O/MgCl<sub>2</sub> molar ratio on strength properties of the magnesium oxychloride cement solidified soft clay and its associated mechanisms[J]. Construction and Building Materials, 2023, 393: 132018-132027.
- [15] AIKEN T A, KWASNY J, RUSSELL M, et al. Effect of partial MgO replacement on the properties of magnesium oxychloride cement[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 134: 104791-104806.
- [16] 刘盼,常成功,刘秀泉,等. 粉煤灰掺量对氯氧镁水泥混凝土物理力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2021,40(5):1564-1572.  
LIU Pan, CHANG Chengong, LIU Xiuquan, et al. Influence of fly ash content of physical and mechanical properties of magnesium oxychloride cement concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(5): 1564-1572.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)